

## Four-Quadrant Operation of a Single-Switch-based Switched Reluctance Drive

하 근 수\*  
(Keunsoo Ha)

**Abstract** - Low cost motor drives are being sought for high volume energy efficient home appliances. Key to the realization of such low cost motor drives is to reduce the power electronic converter in terms of its components, particularly the active devices, finding the motor with least complexity for manufacturing and a controller that could extract the desired performance from the machine and converter combination. These and other factors such as self-starting, speed control over a wide range and most of all the crowning aspect of a four quadrant operation with bare minimum number of controllable switch (or switches) remain as formidable challenges for low cost motor drive realization. In this paper, a four quadrant switched reluctance motor (SRM) drive with only one controllable switch is realized by using a two-phase machine. The theory and operation of the proposed four-quadrant SRM drive with the proposed control algorithm for its realization are described. The motor drive is modeled, simulated and analyzed to verify its feasibility for self-starting, speed control and for four quadrant operation and the simulation results are presented. Experimental results confirm the validity of the proposed control algorithm for four quadrant control of the SRM drive. The focus of the paper is mainly directed toward the control algorithm for realizing the four-quadrant operation of the two-phase SRM drive with a single controllable switch converter.

**Key Words** : Single-Switch-Based Switched Reluctance Motor Drives, Four-Quadrant Operation

### 1. 서 론

가정용 및 전동기기 분야 등에서의 가변속 속도 제어기 개발은 저가형의 고효율 브러시리스 모터의 연구를 중심으로 더욱 확장되고 있다. 또한, 신뢰성, 안정성, 동작 수명 및 소음 등의 이유로 브러시 및 정류자가 없는 모터 개발이 산업체에서 활발히 이루어지고 있는 실정이다[1]. 따라서 저가형의 4상한(four-quadrant) 운전이 가능한 고효율 브러시리스 모터 드라이브 개발은 속도 제어 응용 기기와 더불어 활발히 진행되고 있다. 간단한 모터 구조, 브러시리스 동작, 자석 없이 권선만 있는 회전자 구조 등의 장점을 지닌 스위치드 릴럭턴스 모터(SRM) 드라이브 시스템은 이런 저가형의 속도 제어 시스템에 적용 가능한 후보로 떠오르고 있다.

저가형의 SRM 드라이브에 관련된 논문들이 다수 발표되고 있으며, 대부분의 논문들은 상 당 두 개의 스위칭 소자를 가지는 비대칭형 컨버터(asymmetric converter), 고정자에 영구 자석을 가지는 단상 SRM[1,2], 그리고 세 개의 스위칭 소자를 이용한 2상 SRM[3]으로 구성되어진다. 하지만, 기존 발표된 논문들은 성능적인 측면에서는 만족할 만 수준이나, 가격적인 측면에서는 경쟁력을 가지고 있지 않다.

기동 토크 발생을 위하여 사용되는 정지용 자석

(parking magnet)을 지닌 단상 SRM의 경우, 드라이브의 가격 상승과 더불어 제조상의 어려움을 가지며, 4상한 운전의 어려움을 지니고 있다. 또한 비대칭형 컨버터는 모터의 각 상을 독립적으로 제어할 수 있는 장점을 지니고 있지만, 상당 스위칭 소자가 두 개라는 점, 이로 인한 제어 및 드라이버 회로의 증가 및 가격 상승의 단점을 지니고 있다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 단일 스위치 기반의 SRM 드라이브 시스템[4]이 발표되었다. 이는 가격적인 측면에서 우수한 장점을 지니고 있지만, 단일 스위치 소자를 이용한 1상한 운전(정방향/전동운전)만이 가능하다. 일반적으로 4상한 운전은 두 개 이상의 스위칭 소자를 이용하여 이루어진다.

따라서 본 논문은 가변속 운전이 가능하며, 4상한 운전이 가능한 드라이브 시스템에 중점을 두고자 하며, 이는 단일 스위치 소자를 지닌 2상 SRM 드라이브 시스템 기반으로 구성되어진다.

본 논문에서 제안하는 드라이브 시스템은 보조 권선을 지닌 2상 SRM[5], 단일 스위치형 구조의 컨버터, 그리고 한 개의 DSP 제어기로 구성되어진다. 또한 단일 스위치 소자를 이용한 4상한 운전 알고리즘과 더불어 자기동(self-starting) 알고리즘을 제안하고자 한다. 이는 시스템의 모델링과 시뮬레이션을 통하여 분석되며, 실험을 통하여 검증된다.

본 논문의 구성은 2장에서 2상 SRM 드라이브 시스템을 간략히 소개하며, 자기동을 포함한 4상한 운전 알고리즘의 소개가 3장에서 다루어진다. 또한, 구현된 제어기 구성은 4

\* 정 회 원 : LG전자 선임연구원  
E-mail : hipass@dreamwiz.com  
접수일자 : 2009년 11월 24일  
최종완료 : 2010년 1월 12일

장에서 소개된다. 제안된 시스템의 검증을 위한 자기동 및 4상한 운전 실험에 대한 시뮬레이션 및 실험 결과는 5장, 6장에서 소개된다. 마지막으로 7장에서 결론을 다루게 된다.

## 2. 전동기 및 컨버터 구조

본 장에서는 제안된 드라이브 시스템에 사용된 전동기의 구조 및 컨버터 토폴로지에 대하여 기술한다.

### 2.1 전동기 구조

본 논문에서 사용되는 전동기는 그림 1에서 보듯이 4개의 주고정자극, 4개의 회전자극, 4개의 보조고정자극으로 구성된 2상 SRM[5]의 형태를 가진다. 집중권 방식의 2상 SRM은 직렬로 연결된 주고정자 권선에 여자되는 전류로 주토포크가 발생되며, 보조고정자는 주고정자에 흐르는 권선 전류를 소호(commutation)시키거나, 전동기의 자기동을 위한 보조 토포크 발생용으로 이용된다[5]. 보조고정자는 대각선 방향으로 한 조를 이루며, 이 중 한 조의 보조고정자만이 컨버터와 연결되어진다. 본 논문에서 사용된 2상 SRM의 동작 원리 및 해석 결과는 [5]에 자세히 기술된다.

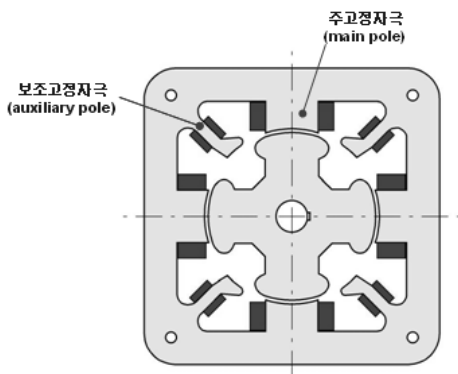


그림 1 2상 SRM의 구조  
Fig. 1 Two-phase SRM's configuration

### 2.2 컨버터 구조

보조권선을 가지는 2상 SRM은 아래 그림과 같이 단일 스위치 소자로 구성된 컨버터와 함께 구성된다.

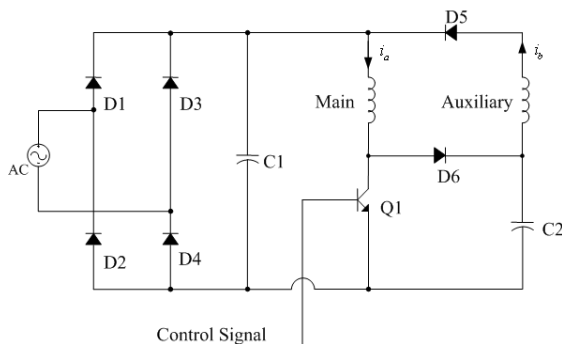


그림 2 4상한 운전이 가능한 단일 스위치 기반 컨버터  
Fig. 2 Single-switch-based converter for four-quadrant operation

제안된 컨버터는 그림 2에서 보이듯이 단상 혹은 3상 AC 전원을 거쳐 일반적인 정류기, 평활콘덴서를 통하여 DC 전압원을 만든다. 제안된 단일 스위치형 구조의 컨버터는 한 개의 스위칭 소자(Q1), 두 개의 다이오드(D5, D6), 한 개의 콘덴서(C2)로 구성된다. 주고정자 권선은 스위칭 소자(Q1)에 의하여 직접 제어된다. Q1이 턴-온될 경우, 주권선에 DC 전압이 공급되며, 보조권선에 흐르던 전류는 DC 링크 콘덴서(C1)에 충전되며, C2를 통하여 순환된다. 반면, Q1이 턴-오프될 경우, 주권선에 흐르던 전류는 D6를 거쳐 C2에 충전되며, 또한 보조권선과 D5을 거쳐 순환되는 두 가지 전류 경로를 가진다. 여기서, C2의 용량은 DC 링크 콘덴서(C1)보다 수백 배 작다.

제안된 컨버터의 동작 원리로부터, 스위칭 소자(Q1)에 의하여 주권선에 흐르는 전류는 직접적인 제어가 이루어지며, 보조권선에 흐르는 전류는 간접적으로 제어가 이루어질 수 있다. 또한 D6와 C2는 스위칭 턴-오프 시점과 소호 시점에서 주권선의 에너지를 전달하는 스너버(snubber) 회로 역할을 하며, 보조권선에 전류를 흐르게 하는 에너지원의 역할을 수행한다.

다이오드 D5는 컨버터 구성에 반드시 필요한 요소는 아니며, 필요시 빠른 응답성을 지니지 않는 일반 다이오드로 구성될 수 있다. 이러한 회로 특징은 현재까지 문헌에 발표된 다른 컨버터 회로들에 견주어 가장 간단하면서 저가의 컨버터 구성을 가능하게 한다.

## 3. 4상한 운전

일반적으로 높은 자유도 특성을 지닌 컨버터 기반의 SRM 드라이브의 4상한 제어에 관한 논문들[6-9]이 발표되었으나, 단일 스위치 기반의 컨버터를 이용한 SRM 드라이브는 연구된 사례는 드물다. 이는 주권선에만 흐르는 전류의 직접적인 제어, 보조권선에 흐르는 전류 및 콘덴서의 상태에 의존하는 단일 스위치형 컨버터의 특성 때문이다. 즉, 보조권선에 흐르는 전류는 단일 스위치의 듀티 사이클, 모터의 속도 및 부하, 보조권선에 부착된 콘덴서에 따라 제어가 이루어진다. 이는 4상한 제어의 어려움을 야기시킨다.

이런 단일 스위치형 구조의 컨버터의 문제점을 보완하는 제어 방법이 본 장에서 기술된다. 4상한 제어를 위하여 두 개의 홀 효과 센서(Hall-effect sensor)를 이용하며, 이를 통하여 회전자의 위치를 파악한다. 홀 센서의 위치는 회전자가 주고정자극과 이루는 정렬 및 비정렬 위치에 놓이게 된다.

### 3.1 정방향(CW)운전-전동(Motoring)/발전(Regeneration)

정방향(CW) 운전시 전동 운전을 하기위하여, 고정자 권선은 회전자가 비정렬 위치(unaligned position)에서 정렬 위치(aligned position)로 이동시 여자되어야 한다. 회전자가 주권선의 비정렬 위치(즉, 보조고정자권선의 정렬 위치)에 도달하였을 경우, 주권선은 여자된다. 회전자가 주권선의 정렬 위치에 도달하였을 경우, 주권선에 흐르는 전류는 턴-오프된다. 예를 들어, 모터가 정방향으로 운전할 경우, 주권선은 회전자가 보조권선으로부터 주권선으로 이동시 여자된

다. 반면에, 발전 제동(regenerative brake)은 회전자가 정렬 위치에서 비정렬 위치로 이동할 때 흐르는 주권선 전류에 의하여 발생된다. 이 때, 모터에서 발생하는 운동에너지는 보조권선을 통하여 DC 링크 전원으로 이동된다. 모터는 정방향으로 여전히 움직이지만, 회전 속도는 발생하는 발전 제동 토크로 인하여 급격하게 줄어든다. 그림 3은 정방향 운전시, 홀 센서 출력, 인덕턴스 및 토크의 변화를 나타낸다.

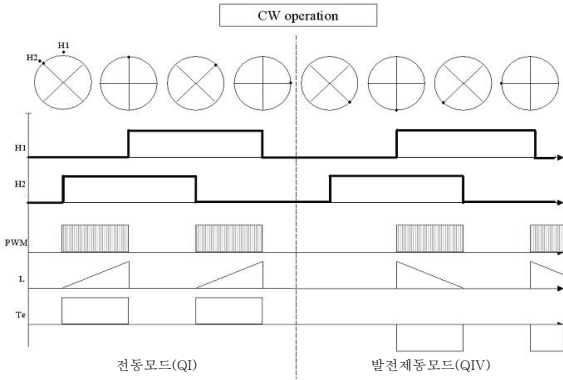


그림 3 정방향 운전 (전동 및 발전 제동 모드)  
Fig. 3 CW operation (motoring & regenerative braking)

전류는 증가하게 되며, 이로 인하여 회전자는 정렬 위치에서 움직이게 된다. C2에 저장된 에너지는 보조권선에 흐르는 전류를 증가시키며, 회전자를 보조고정자로 움직이도록 토크를 발생시킨다. 결과적으로 회전자는 보조고정자극과 정렬될 수 있으며, 역방향 운전이 가능하게 된다. 그림 4는 역방향 운전시, 홀 센서 출력, 인덕턴스 및 토크의 변화를 나타낸다.

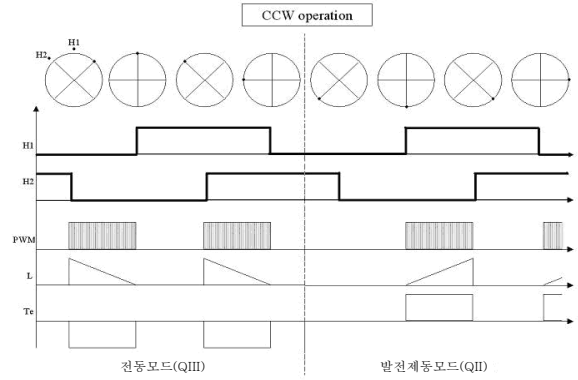


그림 4 역방향 운전 (전동 및 발전 제동 모드)  
Fig. 4 CCW operation (motoring & regenerative braking)

### 3.2 역방향(CCW)운전-전동(Motoring)/발전(Regeneration)

역방향 운전 명령이 발생될 경우, 제어기는 3.1에 기술되었듯이 정방향 발전 제동 운전 모드로 변경된다. 이로 인하여 모터는 정지 위치에 도달한다. 회전자가 정렬 위치에서 비정렬 위치로 이동시 주권선에 인가되는 여자 전류는 회전자를 빠르게 정지시킬 뿐만 아니라, 회전자가 주고정자극과 보조고정자극 사이에 놓일 때 역방향 운전에 대한 단서를 제공한다. 따라서, 회전자가 역방향 운전을 위한 위치선정이 매우 중요하게 된다. 이를 위하여 홀 센서의 출력으로 회전 방향의 전환을 결정하게 되며, 이는 회전자가 보조 고정자극과 일치하는 지점으로부터 결정된다. 이 지점부터 역방향 운전을 위한 전동 모드 운전이 시작되며, 주권선은 여자되기 시작한다.

우선, 역방향 운전을 위하여 PWM 신호는 제거되며, 비정렬 위치를 센싱한 후, 역방향 시작 펄스가 발생된다. 역방향 시작 펄스는 충분한 시간(본 논문에서 "Delay time"으로 불리움)을 가진 후 인가된다. 이는 회전자가 주고정자극과 정렬 위치에 있을 때는 토크를 발생시키지 못하여 움직이지 않는다는 사실에 기인한다. 역방향 시작 펄스의 최적의 인가 지점은 회전자가 주고정자극과 보조고정자극 사이에 위치하였을 경우이며[5], 이를 판단하는 방법은 아래와 같다.

역방향 운전을 위한 시작 펄스는 한 개의 턴-온 신호와 한 개의 턴-오프 신호로 구성된다. 턴-온 신호가 스위치(Q1)에 인가될 때, 전류는 주권선에 흐르게 된다. Q1의 턴-오프 동작시, 주권선에 흐르는 전류는 보조권선에 연결된 콘덴서(C2)를 DC 링크 전압에 해당되는 값으로 충전시키며 보조권선에 흐르게 된다. Q1이 다시 턴-온될 때, 보조권선에 흐르는 전류는 DC 링크 전원으로 회수되어 흐르게 된다. 주권선에 흐르는 전류로 인한 충,방전을 통하여 보조권선의

### 3.3 4상한 운전 알고리즘

4상한 제어의 목적은 4상한 명령에 대한 PWM을 구성하고 역방향 시작 펄스를 발생시키는 것이다. 회전자의 속도가 목표 속도에 도달할 경우, 역방향 시작 펄스는 컨버터에 인가된다. 그림 5는 3.1~3.2에서 언급한 운전 알고리즘을 토대로 작성한 흐름도이다.

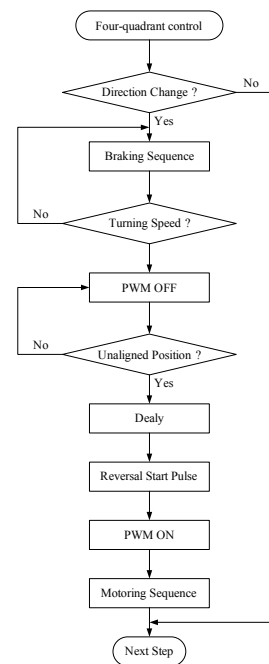


그림 5 4상한 운전 알고리즘  
Fig. 5 Flowchart for the four-quadrant algorithm

4상한 제어를 위하여 제어기는 가장 큰 부토크를 얻도록 비정렬 위치를 체크한다. 최대 부토크는 본 연구에서 사용되는 2상 모터[5]의 경우, 회전자가 비정렬 위치(45°)를 지나 정렬 위치(0°)에 놓일 때 발생된다[5]. PWM Off 명령은 PWM 기능을 해제하여 주권선에 전류가 흐르지 않도록 한다. "Delay"는 회전자가 최대 부토크를 발생하는 위치로 이동하는 데 소요되는 시간이다.

본 논문에서는 4상한 제어를 위한 속도 명령으로 5,000 rpm, 역방향 회전을 위한 임계 속도 값으로 250 rpm으로 설정하여 4상한 제어 검증 시뮬레이션 및 실험을 진행한다.

#### 4. 드라이브 시스템 제어

3장에서 기술한 4상한 제어 알고리즘의 구현을 위한 드라이브 시스템의 제어 블록도는 다음 그림과 구성된다.

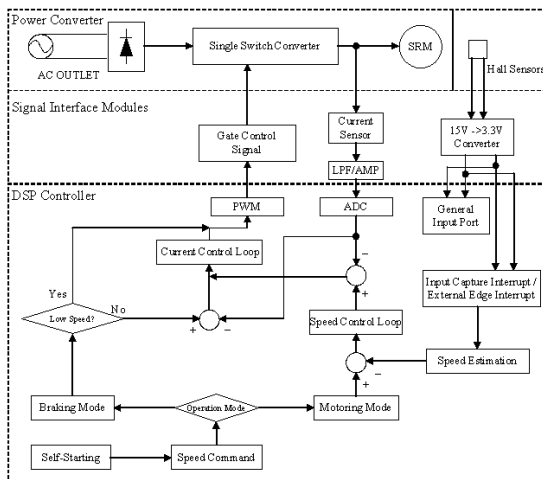


그림 6 드라이브 제어 시스템  
Fig. 6 Proposed motor drive control system

드라이브 시스템은 아날로그 전류를 센싱하며, 45° 간격으로 위치한 2 개의 Hall 센서로부터 회전자 위치 정보를 파악한다. 또한 Hall 센서로부터 파악된 위치 정보를 이용하여 회전자의 속도가 계산된다. 그리고 아날로그 전류 신호는 필터링 과정을 거친 후, Analog-to-Digital(ADC) 변환 과정을 통하여 양자화되어 DSP로 보내어진다.

시스템의 시작은 속도 명령에 의하여 동작되며, 발생하는 속도 명령은 크기와 방향을 가진다. 그리고 모터의 동작 모드는 전동 모드 혹은 발전 제동 모드로 나뉘어진다.

전동 모드일 경우, 현재 속도와 속도 명령과의 차이에 의하여 속도 제어기는 동작되며, 속도 제어기는 PI 제어기로 구성된다. 속도 제어기의 출력은 전류 제어기의 명령으로 보내어진다. 이 때 보내어진 전류 제어기 명령은 PI 전류 제어기를 통하여 실제 전류를 제어하기 위하여 이용된다. 전류 제어기의 출력은 스위치(Q1) 제어를 위한 PWM 신호를 발생하며, 매 PWM 주기마다 업데이트되어 이루어진다.

속도 명령이 발전 제동 모드의 경우, 회전자의 속도가 일정 저속(본 논문에서는 250rpm으로 설정)보다 높을 경우, PI 전류 제어기가 동작된다. 회전자의 속도가 설정된 속도보다 낮을 경우, 제어기는 역방향 펄스를 발생한다. 회전자가

역방향으로 회전할 경우, 제어기는 정상적인 역방향 운전을 위하여 전동 모드에서 운전을 하게 된다.

#### 5. 시뮬레이션

제안된 드라이브 시스템의 성능 검증을 위한 모터, 속도 및 전류 제어기에 대한 각각의 모델은 [10]를 기반으로 작성되며, 컨버터에 사용되는 디바이스들의 전압 강하는 DC 링크의 전압보다 작으므로 이상적인 소자라 가정한다. 스위칭 시 발생하는 과도현상(스위칭 소자의 턴-온 및 턴-오프 타임)은 전기적, 기계적 시정수에 비하여 작으므로 무시한다. 전체 드라이브 시스템은 스위치(Q1)의 통전 및 비통전 상태 방정식으로 해석이 가능하며, 주권선 및 보조권선에 흐르는 전류 및 보조권선에 부착된 콘덴서 전압에 영향을 받는다.

회전자가 정렬 및 비정렬 위치에 있을 경우, 모터의 자기동 특성은 그림 7, 8에 나타나며, 또한 4상한 제어 특성은 그림 9에 규격화(normalized)되어 나타난다.

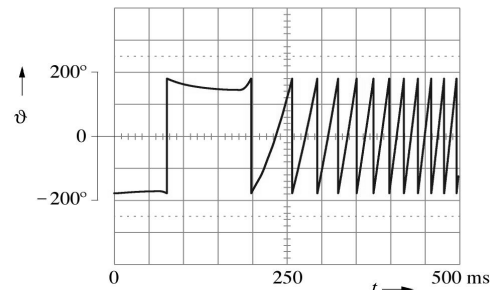


그림 7 정렬 위치에서 초기 기동 (시뮬레이션)  
Fig. 7 Simulation of initial start-up at the aligned position

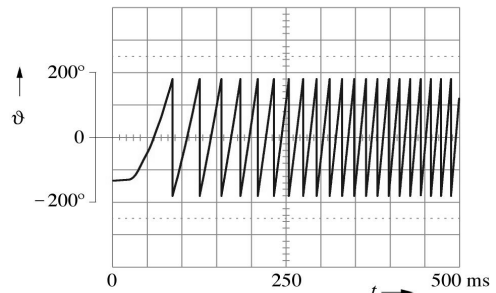


그림 8 비정렬 위치에서 초기 기동 (시뮬레이션)  
Fig. 8 Simulation of initial start-up at the unaligned position

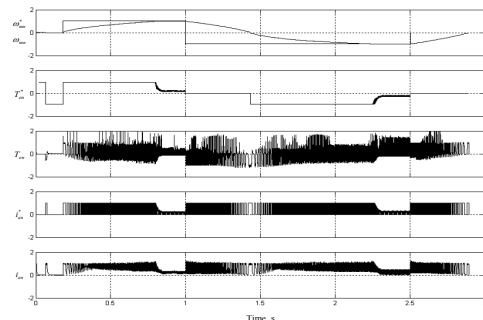


그림 9 4상한 제어 (시뮬레이션)  
Fig. 9 Simulation of four-quadrant operation

모터는 정상적으로 자기동되는 것을 확인할 수 있으며, 특히 정렬 위치에 있을 경우, 시간 간격을 가지며 발생하는 기동 펄스에 의하여 회전자는 서서히 자기동되는 특성을 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과로부터 제안된 드라이브 시스템의 타당성을 검증할 수 있다.

### 6. 실험 결과

제안된 드라이브 시스템의 4상한 제어에 관한 실험적인 검증은 본 장에서 다루고자 한다. 그림 10, 11에는 정렬 및 비정렬 위치에서의 자기동 특성에 대한 결과를 보여준다. 자기동 순간부터 기동 펄스가 발생하고 이에 따라 모터의 속도가 증가하는 그래프를 나타낸다.

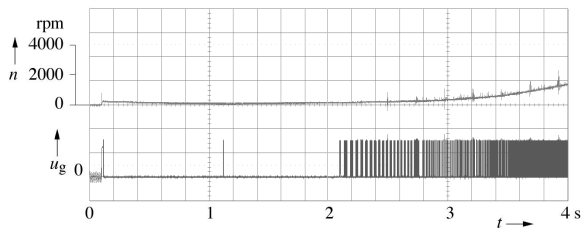


그림 10 정렬 위치에서 초기 기동 (실험 결과)  
Fig. 10 Experimental result at the aligned position

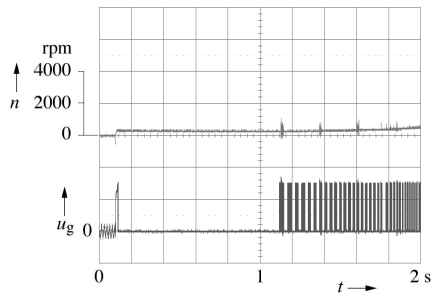


그림 11 비정렬 위치에서 초기 기동 (실험 결과)  
Fig. 11 Experimental result at the unaligned position

그림 12는 정지 상태에서 5,000rpm으로의 정방향 운전, 그리고 다시 -5,000rpm으로의 역방향 운전을 거친 후 정지하는 4상한 운전을 나타낸다. 4상한 운전을 위한 속도 및 전류의 제어 특성을 볼 수 있다. 이상의 실험을 통하여 시뮬레이션에서 검증된 결과를 실험적으로 검증할 수 있다.

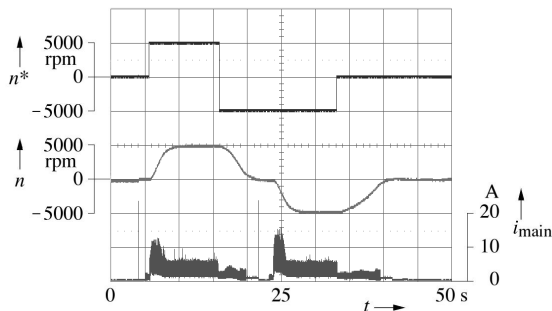


그림 12 4상한 제어 (실험 결과)  
Fig. 12 Experimental result of four-quadrant operation

### 7. 결 론

저가형 모터 드라이브는 제조 단가를 절감할 수 있는 모터, 최소한의 파워 소자로 구성된 컨버터, 이들의 조합으로부터 원하는 제어 성능을 보여줄 수 있는 제어기로 구성할 수 있다. 자기적 구조가 간단한 SRM의 경우, 제조 단가를 절감할 수 있으며, 고정자 권선의 전류를 단 반향으로 제어할 수 있어 저가형의 모터 드라이브 구성이 가능하다.

본 논문에서는 이런 저가형 모터 드라이브 구현을 위하여 단일 스위치를 이용한 2상 SRM의 4상한 제어 시스템을 소개하였다. 4상한 제어를 위한 시스템 및 제어기 구성을 나타냈으며, 이에 대한 검증은 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인할 수 있었다.

제안된 단일 스위치 기반의 2상 SRM 드라이브 시스템은 정렬 및 비정렬 위치에서 자기동이 가능하며, 4상한 운전 특성을 보이는 저가형 모터 드라이브 구현을 위한 하나의 방안을 제시하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] GC.Jenkinson and J.M.Stephenson, "Starting Of A Single-phase Reluctance Motor", IEE 1999, 9th International Conference on Electrical Machines and Drives, 1999, pp. 391-395
- [2] J.Y.Lim, Y.C.Jung, S.Y.Kim, and J.C.Kim, "Single Phase Switched Reluctance Motor for Vacuum Cleaner", IEEE-ISIE, 2001, pp. 1393-1400
- [3] Justin C. Morse, "Design and implementation of a Novel Control System for Four Quadrant Operation of a Two-phase Switched Reluctance Motor", MS thesis, ECE Dept., Virginia Tech, 2003
- [4] R.Krishnan, A.M.Staley, and K.Sitapati, "A Novel Single-phase Switched Reluctance Motor Drive System", IEEE-IECON, 2001, pp. 1488-1493
- [5] Sungyeul Park, "Design and Implementation of Four-quadrant Operation in Single-Switch Based Switched Reluctance Motor Drive System", MS thesis, ECE Dept., Virginia Tech, 2004
- [6] S.Hossain, I.Husain, H.Klode, B.Lequense, and A.Omekanda, "Four-quadrant control of a switched reluctance motor for a highly dynamic actuator load", Proc.IEEE APEC'02, 2002, pp. 41-47
- [7] B.Fahimi and R.B.Sepe Jr., "Development of 4-quadrant sensorless control of SRM drives over the entire speed range", IEEE-IAS Annu. Meeting, 2002, pp. 1625-1632
- [8] G.Suresh, B.Fahimi, K.M.Rahman, M.Ehsani, and I.Panahi, "Four-quadrant sensorless SRM drive with high accuracy at all speeds", IEEE APEC'99, 1999, pp. 1226-1231
- [9] B. Fahimi, A. Emadi, and R.B.Sepe, "Four-quadrant position sensorless control in SRM drives over the

entire speed range," IEEE Transactions on Power Electronics, vol.20, No.1, 2005, pp. 154-163

[10] R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CRC, 2001.

## 저 자 소 개



### 하 근 수 (河 根 秀)

1970년 2월 25일생. 1993년 홍익대 전기 제어공학과 졸업(학사), 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2008년 미국 버지니아텍 졸업(박사), 1995년~2001년 KETI 선임연구원, 2008년~현재 LG전자 CTO HAC 연구소 선임연구원, 2004년 3등 논문상 수상(Industrial Drives Committee of IEEE Industry Applications Society), 2006년 1등 논문상 수상(Industrial Drives Committee of IEEE Industry Applications Society), 2010 Who's who in the world 등재 예정.